

パソコン制御による D/A・A/D 変換学習のための電子回路基板

An Electronic Circuit Board for the Learning of Computer-Controlled D/A and A/D Conversion

小山 英 樹* 馬 場 栄 徳** 豊 嶋 奏 多***
KOYAMA Hideki BABA Eitoku TOYOSHIMA Kanata

コンピュータによる制御や計測を行う上で必須の技術である D/A (デジタル/アナログ) 変換および A/D (アナログ/デジタル) 変換の学習に利用可能な、コンパクトで可搬性の高い電子回路基板を開発した。小型抵抗器を組み合わせた R-2R ラダー回路で 8 ビット電圧加算型 D/A 変換回路を構成し、それと汎用オペアンプによるコンパレータで 8 ビット逐次比較型 A/D 変換の処理ができるようになっている。パソコンとの間のデータの出入力は安価なインターフェース基板を通して行い、また外部電源が不要なため全体として低コストで、さらに汎用のプログラミング言語 (Visual Basic) を使用しているため応用の幅が広い。実験による評価の結果、授業等での学習には十分な D/A・A/D 変換の精度を有していることが確認できた。

キーワード : DA 変換, AD 変換, 教材, 教具, 技術教育

Key words : DA conversion, AD conversion, teaching material, teaching tool, technology education

1. はじめに

近年、マイクロコントローラを用いたさまざまな電子回路基板 (マイコンボード) が比較的安価に入手できるようになった。プログラムを作成することにより、ボードに接続した回路に任意の電圧を加えたり (制御)、あるいはボードに接続されたセンサの出力電圧を測定したり (計測) することが容易にできる。そのため、計測・制御やプログラミングの学習など、学校教育の現場で広く活用されている¹⁻⁹⁾。

しかし、実際にはコンピュータで処理するデータはすべてデジタルであり、「0」と「1」の二つの数字の組み合わせで表されている。一方で、回路に加える電圧やセンサの出力電圧はアナログである。プログラムによる処理で回路に加える電圧が決まっても、コンピュータの中ではそれは「0」と「1」の組み合わせであらわされたデジタルデータであり、デジタル/アナログ変換 (D/A 変換) を行うことによって初めて回路にアナログ電圧として出力される。また、センサのアナログ出力電圧をコンピュータに取り込んで処理するためにはアナログ/デジタル変換 (A/D 変換) を行って「0」と「1」だけで表されたデジタルデータに変換する必要がある。

このように、コンピュータによる計測や制御においては D/A 変換や A/D 変換は必須の技術であるが、市販の多くのマイコンボードではそれらをあまり意識せず使

用することができるため、D/A・A/D 変換技術のみならず、デジタルとアナログの違いについてさえも十分理解せずに終わってしまう恐れがある。そこで本研究では D/A・A/D 変換の役割が十分理解できるよう、デジタルデータの入出力しかできない市販のインターフェース基板を用い、それに簡易な D/A・A/D 変換回路を外部接続することでアナログ電圧の出力や入力ができるようにした基板の開発を行った。D/A 変換や A/D 変換については専用の IC も市販されているが、それらを使用することはせず、原理が理解しやすい抵抗ラダー回路による電圧加算型 D/A 変換¹⁰⁻¹⁴⁾ とそれを利用した逐次比較型 A/D 変換¹²⁻¹⁸⁾ を行うようにしている。

2. D/A・A/D 変換の原理

2.1 D/A 変換と A/D 変換

図 1 は D/A 変換と A/D 変換の関係を 4 ビットの場合を例にして示したものである。縦方向は電圧であり、 $0 \sim V_{REF}$ (参照電圧) が $2^4 (=16)$ 等分され、それぞれに 4 ビットのデジタルデータが割り当てられている。A/D 変換は、入力されたアナログ電圧がこれらの 16 個のマスの中のどれに入るかを見出し、そのマスのデジタルデータを出力するものである。これに対し D/A 変換は、各マスの底辺に相当する電圧が低い方から順に 4 ビットのデジタルデータに対応付けられており、入力されたデジタルデー

*兵庫教育大学大学院学校教育研究科人間発達教育専攻生活・健康・情報系教育コース 教授

令和 5 年 10 月 17 日 受理

**兵庫教育大学大学院連合学校教育学研究科 (博士課程) 教科教育実践学専攻生活・健康系教育連合講座

***兵庫教育大学大学院学校教育研究科 (修士課程) 人間発達教育専攻生活・健康・情報系教育コース

タに応じてその対応する電圧を出力するものである。したがって A/D 変換と D/A 変換は完全に逆のプロセスではなく、あるアナログ電圧を A/D 変換し、それを D/A 変換すると、出力される電圧は最大で 1 LSB (最下位ビット, 4 ビットの場合は $V_{REF}/16$) だけ低くなる。

4 ビットのデジタルデータを $a_3a_2a_1a_0$ ($a_0 \sim a_3$ は 0 または 1) とすると、これを D/A 変換したときの出力電圧 V_{OUT} は以下の式で表される。

$$V_{OUT} = V_{REF} \left(\frac{1}{2}a_3 + \frac{1}{4}a_2 + \frac{1}{8}a_1 + \frac{1}{16}a_0 \right) \quad (1)$$

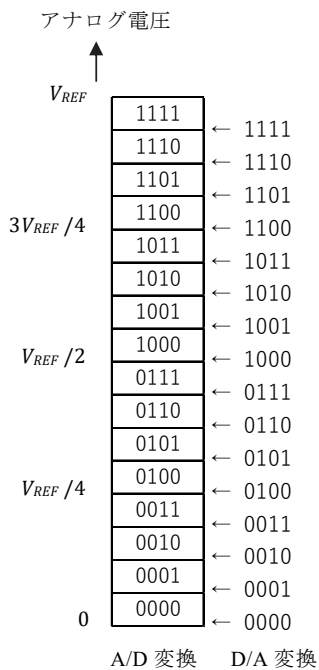
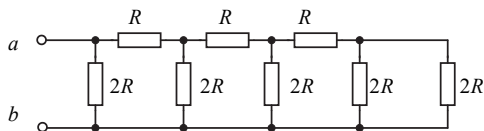


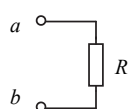
図 1. D/A 変換と A/D 変換

2.2 抵抗ラダー回路による電圧加算型 D/A 変換

図 2 に示す R-2R ラダー回路は、 R と $2R$ のペアがいくつであっても $a-b$ 間の合成抵抗が R になるという興味深い特徴を持っている。電圧加算型 D/A 変換回路はこの性質を利用している。



(a) R-2R ラダー回路の一例



(b) 合成抵抗

図 2. R-2R ラダー回路とその合成抵抗

いま、図 3 (a) ~ (d) のように R-2R ラダー回路の中のどれか一つの岐路に直流電源を入れたとき、左端の $2R$ の抵抗にかかる電圧 ($V_1 \sim V_4$) がどうなるかを考える。電源の電圧は E でどれも同じであるが、位置は (a), (b), (c), (d) の順の一つずつ右側にずれている。これらの回路を上述した R-2R ラダー回路の性質を利用して合成抵抗を使って表すと、四つの回路は最終的にすべて図 4 のように直流電源とその直列抵抗 R 、およびその左右に $2R$ の抵抗が一つずつの回路と同等になる。

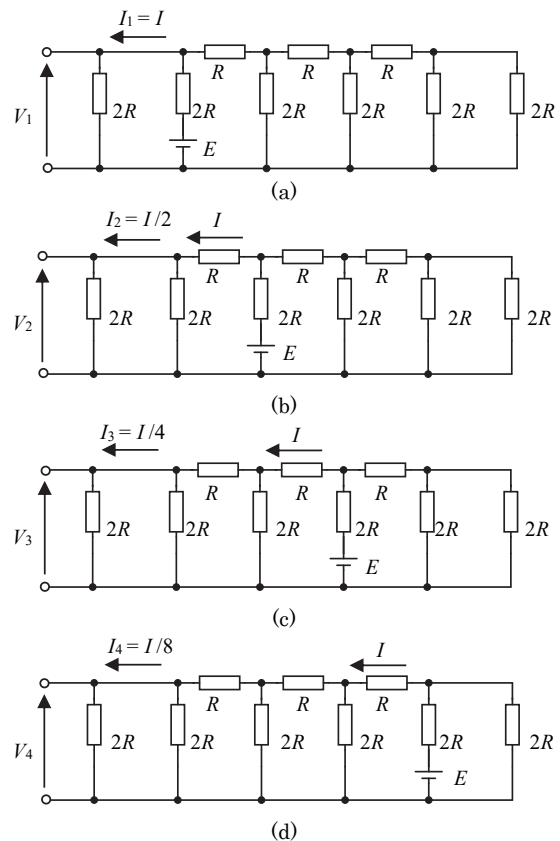


図 3. 直流電源を 1 個入れた回路

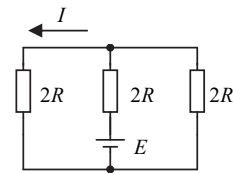


図 4. 合成抵抗で表した回路

図 4 の回路において、電源のある岐路から左側に分岐して $2R$ の抵抗を流れる電流 I は

$$I = \frac{E}{6R} \quad (2)$$

となるが、これは図 3 (a) ~ (d) の回路においてそれぞれの電源がある岐路から向かって左側の回路に分岐した電流にも等しい。(a) ではこの電流がそのまま左端

の $2R$ の抵抗を流れる ($I_1 = I$) が、(b) では $2R$ の抵抗が2本並列接続された状態になっているため、左端の抵抗には半分 ($I_2 = I/2$) の電流が流れる。(c) では $1/4$ ($I_3 = I/4$)、(d) では $1/8$ ($I_4 = I/8$) の電流が左端の $2R$ の抵抗を流れることがわかる。したがって

$$I_1 = \frac{E}{6R}, \quad I_2 = \frac{E}{12R}, \quad I_3 = \frac{E}{24R}, \quad I_4 = \frac{E}{48R} \quad (3)$$

となり、抵抗に生じる電圧降下 $V_1 \sim V_4$ は

$$V_1 = \frac{E}{3}, \quad V_2 = \frac{E}{6}, \quad V_3 = \frac{E}{12}, \quad V_4 = \frac{E}{24} \quad (4)$$

となる。

次に図5のように両端を除くすべての岐路にそれぞれ電源 E がある場合について考える。このとき、最も左側の $2R$ の抵抗にかかる電圧 V_{OUT} は、回路理論の重ね合わせの原理により、以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} V_{OUT} &= V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \\ &= \frac{2}{3}E \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

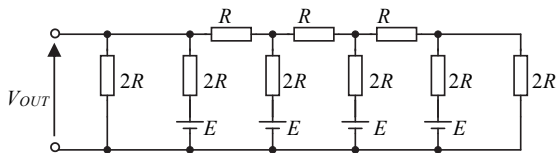


図5. 各岐路に直流電源がある場合

ここで4個の電源の代わりに図6のように各岐路にスイッチを置き、 $a_0 \sim a_3$ (それぞれ0または1の値をとる) の値が0の場合は $2R$ の下端がGNDに、また1の場合は電源 E の正極に接続されるようにした場合を考える。

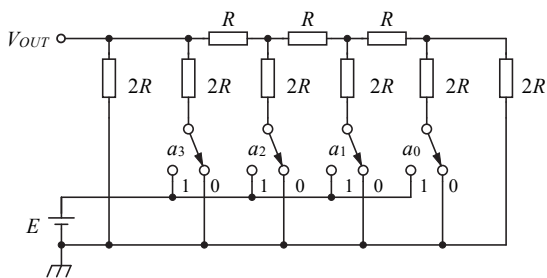


図6. スイッチで置き換えた回路

この場合、 $a_0 \sim a_3$ がすべて1であれば(5)式と同じになるが、0があった場合、それに対応する項を0にすればよい((5)式の $V_1 \sim V_4$ のうち、対応する電圧が0になるため)。したがって

$$V_{OUT} = \frac{2}{3}E \left(\frac{1}{2}a_3 + \frac{1}{4}a_2 + \frac{1}{8}a_1 + \frac{1}{16}a_0 \right) \quad (6)$$

と表される。これは参照電圧 V_{REF} が

$$V_{REF} = \frac{2}{3}E \quad (7)$$

の4ビットD/A変換の式に他ならない。このようにR-2Rラダー回路を利用すれば電圧加算型D/A変換を簡単な回路で行うことができる。実際には $a_0 \sim a_3$ は機械的なスイッチではなく、インターフェースICなどからのデジタル信号出力が使用される。

2.3 逐次比較型A/D変換

A/D変換は、アナログ入力電圧(ただし $0 \sim V_{REF}$ の間)が図1においてどのマスに入るかを判断すればよい。したがって4ビットの場合、 $0, V_{REF}/16, 2V_{REF}/16, \dots$ の各電圧と順次もしくは同時に比較をすればよいのであるが、順次に比較をした場合は処理時間がかかり、また同時に比較する場合には多数の比較回路が必要になる(実際には後者はフラッシュ型A/D変換と呼ばれ、高速にA/D変換できる方式の一つとして実用化されている^{15,16)})。その問題を解決するのが逐次比較型A/D変換と呼ばれる方式である。逐次比較方式では、一つのビットにつき1回の比較でA/D変換の処理を行う。つまり4ビットでは4回、8ビットでは8回の比較で変換が終了する。

アナログ電圧

	a_3	a_2	a_1	a_0
V_{REF}	1	1	1	1
	1	1	0	1
	1	0	1	1
	1	0	0	1
	0	1	1	1
	0	1	0	1
	0	0	1	1
	0	0	0	1
$V_{REF}/2$	1	1	1	0
	1	1	0	1
	1	0	1	1
	1	0	0	1
	0	1	1	0
	0	1	0	1
	0	0	1	1
0	0	0	0	1

図7. 電圧と各ビットの値の関係

図7は4ビットの場合を例に、入力アナログ電圧 ($0 \sim V_{REF}$) と各ビットの値 (a_3, a_2, a_1, a_0) との関係を示したものである。図からまず、 a_3 は入力アナログ電圧 V_{IN} が $V_{REF}/2$ 以上であれば1、そうでなければ0となることがわかる。したがって V_{IN} と $V_{REF}/2$ を比較すれば a_3 が決定する。ここで、 $V_{REF}/2$ はデジタルデータ“1000”を

D/A 変換した結果の電圧であるのでこれを V_{DA} (1000) と表すことにすると、この処理は

- ① V_{IN} と V_{DA} (1000) を比較
 $V_{IN} \geq V_{DA}$ (1000) であれば $a_3 = 1$
 $V_{IN} < V_{DA}$ (1000) であれば $a_3 = 0$

とまとめることができる。

次に a_2 であるが、これは図7より $V_{REF}/4 \leq V_{IN} < V_{REF}/2$ もしくは $3V_{REF}/4 \leq V_{IN}$ であれば 1, そうでなければ 0 である。一見、複数回の比較が必要になるようにも見えるが、 a_3 が 0 であれば $V_{REF}/4$, 1 であれば $3V_{REF}/4$ と比較を行うのみでよい。これらの電圧はすでに決定している a_3 を用いれば V_{DA} ($a_3 \cdot 100$) と表すことができるので、 a_2 を決定するためには

- ② V_{IN} と V_{DA} ($a_3 \cdot 100$) を比較
 $V_{IN} \geq V_{DA}$ ($a_3 \cdot 100$) であれば $a_2 = 1$
 $V_{IN} < V_{DA}$ ($a_3 \cdot 100$) であれば $a_2 = 0$

のように比較を 1 回行えばよい。

同様に、 a_1 を決定するためには V_{DA} ($a_3 a_2 \cdot 10$) と、また a_0 については V_{DA} ($a_3 a_2 a_1$) と、それぞれ 1 回ずつ比較をすればよい。

- ③ V_{IN} と V_{DA} ($a_3 a_2 \cdot 10$) を比較
 $V_{IN} \geq V_{DA}$ ($a_3 a_2 \cdot 10$) であれば $a_1 = 1$
 $V_{IN} < V_{DA}$ ($a_3 a_2 \cdot 10$) であれば $a_1 = 0$

- ④ V_{IN} と V_{DA} ($a_3 a_2 a_1$) を比較
 $V_{IN} \geq V_{DA}$ ($a_3 a_2 a_1$) であれば $a_0 = 1$
 $V_{IN} < V_{DA}$ ($a_3 a_2 a_1$) であれば $a_0 = 0$

以上のように逐次比較方式ではビット数と同じ回数の電圧比較を行い、上位のビットから順に決定していく。

3. 基板の構成

3.1 概要

図8に本基板全体の回路図、図9に基板の外観を示す。8ビットのポート1と4ビットのポート2の二つのデジタル入出力ポートをもつ安価なインターフェース (USB-IO2.0¹⁹⁾) を用い、パソコン制御により電圧加算型 D/A 変換および逐次比較型 A/D 変換の実験ができるようになっている。基板には温度センサ IC (LM35DZ) も装備されており、A/D 変換の応用として温度測定の実験を行うこともできる。さらに空いたポート (ポート2の下位3ビット)にはフルカラーLEDが接続されており、

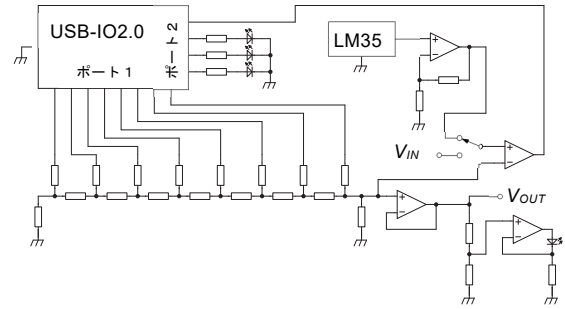


図8. 基板全体の回路図

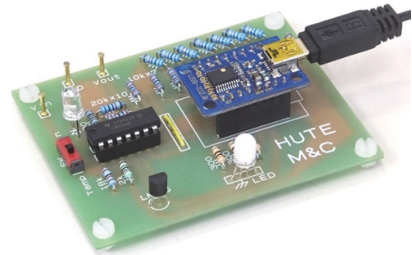


図9. 基板の外観 (写真)

D/A, A/D 変換に入る前の予備的な実験としてデジタルデータの出力 (LED の点灯制御) を行うことができる。プログラミング言語は Visual Basic や Excel VBA が利用可能である。

3.2 D/A 変換回路

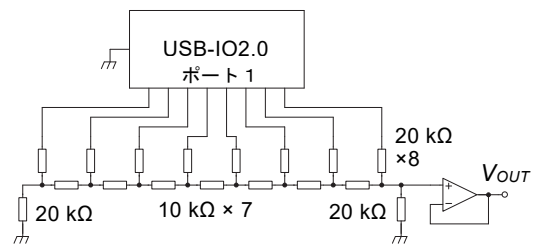


図10. D/A 変換回路

本基板の D/A 変換に関わる部分の回路図を図10に示す。インターフェース (USB-IO2.0) のポート1 (8ビット) に $10\text{ k}\Omega$ と $20\text{ k}\Omega$ の抵抗による R-2R ラダー回路を接続し、D/A 変換回路を構成している。入力する8ビットのデジタルデータを $a_7 a_6 a_5 a_4 a_3 a_2 a_1 a_0$ ($a_7 \sim a_0$ は 0 または 1) とすると、出力電圧 V_{OUT} は

$$V_{OUT} = V_{REF} \left(\frac{a_7}{2} + \frac{a_6}{4} + \frac{a_5}{8} + \frac{a_4}{16} + \frac{a_3}{32} + \frac{a_2}{64} + \frac{a_1}{128} + \frac{a_0}{256} \right) \quad (8)$$

と表される。入力デジタルデータを 10 進数 N で表すと $N = 128a_7 + 64a_6 + 32a_5 + 16a_4 + 8a_3 + 4a_2 + 2a_1 + a_0$ (9) であり V_{OUT} は

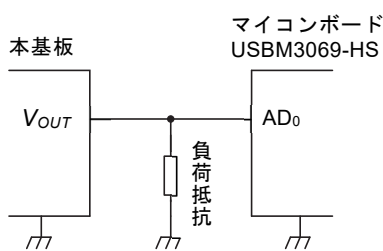


図 14. D/A 変換特性の測定回路

測定結果を図 15 に示す。1 kΩ 以上の負荷抵抗を用いた場合、測定された D/A 変換出力電圧は (10) 式で計算される理論値とほぼ一致し、その差はマイコンボードの A/D 変換誤差である ±4 LSB (約 20 mV) の範囲内に収まっている。一方で 100 Ω 以下の場合は、ボルテージフォロワとして使用しているオペアンプ (LM324AN) の最大出力電流に達した後、出力電圧が飽和する傾向が見られた。低抵抗の負荷で使用する場合はこの最大出力電流に注意する必要がある。

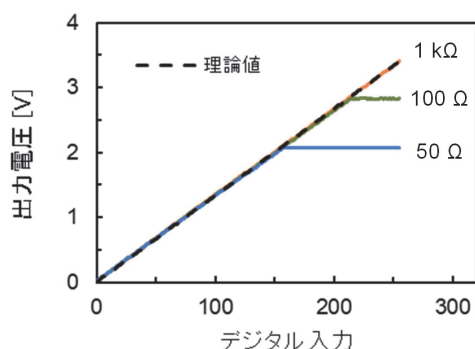


図 15. D/A 変換特性の測定結果

4.2 A/D 変換特性

A/D 変換特性の評価も上述のマイコンボード (USBM3069-HS) を利用して行った。図 16 に示すようにマイコンボードの 8 ビット D/A 変換出力端子 (DA₀ 端子) を本基板の V_{IN} 端子に接続し、マイコンボードより 0 ~ 約 3.3 [V] の電圧を出力してその電圧を本基板の A/D 変換機能により測定した。

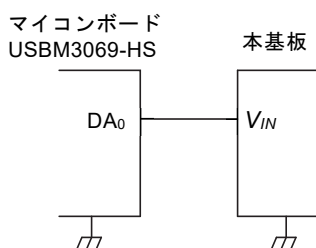


図 16. A/D 変換特性の測定回路

測定結果を図 17 に示す。測定電圧は、マイコンボードのデジタル入力から計算される理論値とほぼ一致し

ている。マイコンボードの D/A 変換の絶対精度が ±1.5 LSB (約 30 mV) となっており、測定電圧と理論値との差はこの範囲内に十分収まっている。

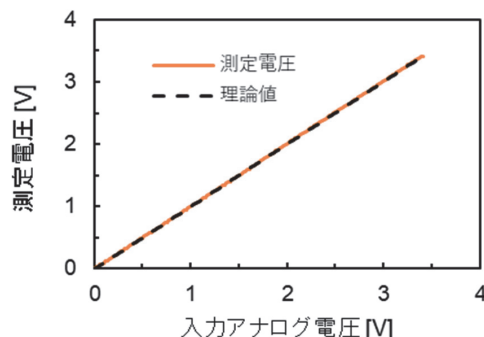


図 17. A/D 変換特性の測定結果

5. まとめと教具としての展望

R-2R ラダー回路による D/A 変換、およびそれとコンパレータを用いてパソコンのプログラムで制御する A/D 変換の両者の実験が手軽にできる電子回路基板を開発した。特性評価の結果、D/A・A/D 変換の学習には十分な精度で変換可能であることが分かった。

本基板はさらにパソコンから供給される電源だけでこれらの実験ができ、外部電源が不要なためコンパクトで可搬性が高いこと、また Visual Basic という汎用性の高い言語でプログラミングができるため応用がしやすいこと、などの利点もある。これらの点から中学校や高校、大学などの教育現場での活用が期待される。

中学校技術・家庭科 (技術分野) では内容 D (情報の技術) の中で、計測・制御システムについて学習する。学習指導要領解説にはその内容の取扱いに関して「センサ、コンピュータ、アクチュエータ等の計測・制御システムの要素や、計測・制御システムの各要素において異なる電気信号 (アナログ信号とデジタル信号) を変換し、各要素間で情報の伝達が行えるようにするためにインタフェースが必要であること、計測・制御システムの中では一連の情報がプログラムによって処理されていることなどの計測・制御システムの仕組みについて理解させる。」と書かれている²⁰⁾が、本基板を用いることでこれらの学習を効果的に行うことができると考えられる。具体的には、初めにフルカラー LED の点灯を制御することでコンピュータが扱うデータはデジタルのみであることを確認した後、D/A・A/D 変換を実際に体験し、アナログ電圧の制御や計測のためにこれらの技術が必要であることを学ぶ、という手順が考えられる。Visual Basic によるプログラミングは中学生にはやや高度であるため、事前にプログラムを作成し、授業ではそれを利用する形にとどめるのが良いかもしれない。

高等学校工業科では複数の電気系科目でD/A・A/D変換に関わる内容を扱うが、特に「電子技術」では学習指導要領に「AD変換回路、DA変換回路の原理と活用例を扱うこと。」と明記されている²¹⁾。本基板を用いてアナログとデジタルの違いを十分理解させることから始めれば、その後の具体的な変換方法や応用についての学習が効果的に進められると思われる。また「課題研究」ではパソコンを使用した計測・制御に関わるものが多く製作されているが、初めに本基板を用いてD/A・A/D変換の基本を再確認するようにすればその後の製作活動がスムーズに展開できると考えられる。もちろん、製作にあたり、本基板で使用している回路やプログラムそのものを参考にすると、という利用方法もありうる。

一方で、工業科では「電子回路」などの授業でオペアンプ（演算増幅器）についても学ぶ。本基板は非反転増幅回路、ボルテージフォロワ、コンパレータ、電流-電圧変換回路の四つの基本的なオペアンプ回路を使用しており、オペアンプの学習にも利用できる。

文献

- 1) 光永法明, 奈良明香: プログラムによる計測・制御の授業前における生徒の題材・構成部品の違う製作例への関心の調査, 日本産業技術教育学会誌, 第60巻, 第4号, pp. 181-190 (2018) .
- 2) 門田和雄, 猪股晃洋, 長嶋春樹: 中学校技術科における教育用小型マイコンボードを活用したラジコンカーの開発, 日本産業技術教育学会誌, 第61巻, 第4号, pp. 297-304 (2019) .
- 3) 村上志穂, 千田峻吾, 岡田倫明, 坂本弘志, 松原真理: マイクロビットを用いた小学校プログラミングの授業実践, 宇都宮大学教育学部教育実践紀要, 第6号, pp. 531-534 (2019) .
- 4) 宮本賢治, 塚田直也: 小学校における制御ロボットを活用したプログラミング授業の実践と検証, 日本産業技術教育学会誌, 第62巻, 第3号, pp. 257-265 (2020) .
- 5) 木村尚仁, 渡部智希, 碓山恵子, 塚越久美子: フィジカルプログラミング講座への教育用電子楽器「フォトミン」の活用, 工学教育, 第69巻, 第2号, pp. 63-68 (2021) .
- 6) 中峯浩, 向井智世子: micro:bitを用いたプログラミング授業の実践—中学生の興味・関心における変化—, 教職キャリア高度化センター教育実践研究紀要, 第3号, pp. 257-260 (2021) .
- 7) 石橋直, 大日方優太, 伊藤克治: マイクロビットを用いたインターバル撮影システムの開発, 福岡教育大学紀要, 第70号, 第3分冊, pp. 47-54 (2021) .
- 8) 秋葉治克: 技術科教育におけるステップングモーター教材の開発, 北海道教育大学紀要 (自然科学編), 第71巻, 第2号, pp. 23-36 (2021) .
- 9) 野崎晃由, 川崎弘太郎, 倉田伸, 杉野本勇氣, 山田真子, 江頭徹: 小学校算数科における小型コンピュータボードを用いたプログラミング教育に関する教職志望学生用教材の開発, 長崎大学教育学部紀要 (教育科学), 第85号, pp. 71-76 (2021) .
- 10) 渡辺明禎: VBと製作で学ぶ初めてのパソコン応用工作, CQ出版社 (2002) .
- 11) 池田政也, コンピュータを用いた簡易な電流-電圧特性測定装置の開発, 兵庫教育大学大学院学校教育研究科修士論文 (2010) .
- 12) 小山英樹, 西村尚大: 発光ダイオードを温度センサとして用いた簡易なパソコン制御温度計測システム, 兵庫教育大学研究紀要, 第51巻, pp. 73-77 (2017) .
- 13) 小山英樹, 殷夢澤: 2色LEDの光センシング特性と障害物検知への応用, 兵庫教育大学研究紀要, 第53巻, pp. 103-108 (2018) .
- 14) 小山英樹, 西村尚大: 発光ダイオードの温度センシング機能を利用した簡易な計測制御システム, 兵庫教育大学研究紀要, 第55巻, pp. 19-23 (2019) .
- 15) 河合一: A-Dコンバータ活用ノート, CQ出版社 (2010) .
- 16) 松井邦彦: A-Dコンバータ活用成功のかぎ, CQ出版社 (2010) .
- 17) 劉悦, 小山英樹: ダイオードの絶対温度に比例する物理量を利用した温度測定システム, 第76回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, p.01-044 (2015) .
- 18) 王宇熙, 小山英樹: パソコン制御による簡易な加法混色学習システム, 第77回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, p. 01-060 (2016) .
- 19) 小松博史: かんたん! USBで動かす電子工作, オーム社 (2011) .
- 20) 文部科学省: 中学校学習指導要領 (平成29年告示) 解説 技術・家庭編 (2017) .
- 21) 文部科学省: 高等学校学習指導要領 (平成30年告示) (2017) .

